

07 16 4 6 7-1

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 532.5.031 + 621.9.047

На правах рукописи

ШКАРБАН АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И ГИДРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ
ЭЛЕКТРОЛИТА В ЗАЗОРЕ

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Казань – 2000

Работа выполнена на кафедре аэрогидромеханики
Казанского государственного университета

Научный руководитель

доктор физ.-мат. наук профессор Клоков В.В.

Официальные оппоненты

Чл.-корр. АНТ, доктор физ.-мат. наук
профессор Кузнецов А.В.

доктор физ.-мат. наук профессор Житников В.П.

Ведущая организация - Камский политехнический институт

Защита состоится 25 мая 2000 г в 14 часов 30 минут в ауд. физ.
2 на заседании диссертационного совета Д 053.29.01 по защите
диссертации на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по механике при Казанском государственном
университете (420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
КГУ

Автореферат разослан 24 апреля 200 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
КФУ



0000947687

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, доцент

Саченков А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

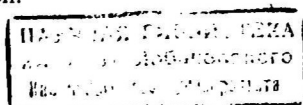
Актуальность Электрохимическая размерная обработка металлов (ЭХО) — прогрессивный технологический процесс в современном машиностроительном производстве. Она основана на принципе локального анодного растворения металла при высокой плотности тока в проточном электролите. Широкое применение процесса обусловлено использованием в авиастроении, двигателестроении, приборостроении деталей из новых жаропрочных, высокопрочных и вязких конструкционных материалов, новых сплавов с повышенными физико-химическими свойствами, обработка которых обычными способами затруднена.

Внедрение электрохимической размерной обработки в машиностроение потребовало изучения электрохимических процессов, создания и совершенствования моделей и методов их расчетов. Значительный вклад в изучение процесса ЭХО внесли: В.Н.Гусев, Ф.В.Седыкин, И.И.Мороз, Ю.Н.Петров, Л.М.Щербаков, В.П.Смоленцев, А.Х.Каримов, Г.Н.Корчагин, Ю.С.Волков, А.Л.Крылов, Л.Б.Дмитриев, В.И.Филин, В.В.Любимов, А.И.Дикусар, Г.Н.Зайдман, А.Д.Давыдов, В.П.Житников, А.Н.Зайцев, Е.М.Румянцев, Л.М.Котляр, З.Б.Садыков, В.В.Клоков, Е.И.Филатов, Y.G.Nilson, H.Tipton, J.A.McGeough, J.Kozak, R.C.Hewson-Drown, R.H.Nilson, Y.G.Tsuei, H.Rasmussen, M.B.Nanayakara, V.K.Jain, P.C.Pandey, A.Ruszej L.Dabrowski и другие.

Электрохимическая размерная обработка является сложным процессом, в котором кинетика электродных процессов тесно связана с сопутствующими процессу явлениями взаимодействия с гидродинамикой течения электролита, тепломассопереноса газообразных продуктов реакции и шлама, перераспределения зарядов в межэлектродных слоях. С этим связан тот факт, что процесс ЭХО до сих пор остается недостаточно управляем технологически, что приводит к недостаточной для современного производства точности.

Процесс электрохимической размерной обработки реализуется при обязательной прокачке электролита в межэлектродном зазоре и его гидродинамическое описание является сложной задачей. Сложность описания обусловлена многофазностью среды, совершающей движение в зазоре; она состоит из твердых частиц (шлама), пузырьков газа (газообразных продуктов реакции), переносимых водным или неводным раствором электролита. Особая проблема описания таких движений имеет место в областях подачи электролита в межэлектродный зазор или его отбора. Способы подачи электролита в зазор определяются различными технологическими схемами, но все они предназначены для подвода и отвода продуктов реакции из узких межэлектродных зазоров. Существуют схемы перфорированных и даже пористых катодов инструментов. Большие трудности возникают при описании гидродинамических потоков в окрестности кромок катодов — инструментов, в областях подтравливания под изоляцию. При этом следует учитывать изменения границ областей течения, вызванное возможным движением катодного инструмента и растравливанием анодных границ в процессе электрохимического формообразования. В ряде режимов электрохимической обработки наблюдаются запирающие зазора газовыми пузырьками или твердыми продуктами реакции, приводящими к коротким замыканиям.

Математические модели ЭХО, согласно допущениям об одно- двух- или трехмерности электрического поля в межэлектродном промежутке, можно разделить на одно-, двух- и трехмерные. Расчет анодных сложнопрофильных поверхностей производится по двумерным и трехмерным моделям. Одномерные модели не дают удовлетворительных результатов для сложнопрофильных анодных границ, особенно в местах резкого изменения границ. Трехмерные модели очень трудны для применения, анализа и выполнения серийных технологических расчетов. Двумерные модели дают более точное описание электрохимической обработки и проще трехмерных моделей при расчетах сложных деталей.



Цель диссертационной работы

1. Разработать метод расчета гидродинамики течения в межэлектродном зазоре в окрестности угловой точки катода-инструмента с учетом подачи электролита через катод –инструмент при стационарном режиме ЭХО.

2. Выполнить расчет линий тока, изобар в случае установившегося плоскопараллельного течения при стационарном режиме ЭХО, выполнить расчет, провести анализ областей торможения и больших скоростей потока как зон возможного скопления продуктов реакции и кавитации.

3. Разработать метод расчета электрохимического фрезерования (хонингования) катодом-инструментом с учетом областей диэлектрического покрытия катода-инструмента.

4. Разработать методы расчета гидродинамики течения для схемы электрохимического фрезерования (хонингования) с учетом подтавливания под изоляцию.

5. Провести анализ гидродинамических полей в области подтавливания под изоляцию, а так же вязких напряжений на анодной поверхности.

6. Разработать метод расчета стационарного анодного формообразования с учетом зоны локализации обработки для вариантов обработки по схемам электрохимической прошивки каналов, скругления острых кромок и заточки инструмента, а так же электрохимического фрезерования (хонингования).

7. Выполнить расчет гидродинамических полей в межэлектродном зазоре, а так же переноса продуктов реакции с учетом возникновения зоны локализации обработки.

8. Разработать программный комплекс для расчета на персональных ЭВМ с возможной реализацией диалогового режима.

На защиту выносятся:

1. Разработка методов расчет гидродинамики течения электролита в МЭП при стационарной ЭХО для различных схем подачи электролита.

2. Разработка методов расчета формообразования при стационарном электрохимическом хонинговании (фрезерования).

3. Разработка методов расчета гидродинамики течения электролита при электрохимическом хонинговании (фрезерования)..

4. Разработка методов расчета электрохимического формообразования с учетом зоны локализации процесса анодного растворения металла.

5. Разработка методов расчета гидродинамики течения электролита при ЭХО с учетом зоны локализации.

6. Разработка методов расчета траекторий движения продуктов реакции в межэлектродном зазоре.

7. Разработка программного комплекса для расчета, расчет и анализ результатов.

Достоверность научных положений диссертации обеспечивается использованием математически обоснованной методики решения и применением апробированных численных методов при реализации решения. Обоснованность полученных результатов подтверждается их физической правдоподобностью и совпадением результатов решения частных и предельных задач с известными теоретическими данными.

Практическая ценность. Тема диссертации связана с выполнением плановой темы «Краевые задачи теории электрохимической размерной обработки» № Гос. Регистрации 01910049980, 01960002006, являющейся частью основного научного направления Казанского государственного университета (КГУ) «Краевые задачи и их приложение». Диссертация выполнялась также в рамках и при поддержке грантов: Фундаментальным исследованием технологических проблем производства авиакосмической техники (головная организация МГАТУ им. К.Э.Циолковского) на тему: «Развитие системы программного обеспечения проектирования катода-инструмента и расчета формообразования размерной электрохимической обработки деталей» (научный руководитель – проф. Клоков В.В.). (1996–1997гг.); Гранта АН Республики Татарстан (№01-18) на тему: «Математическая модель процесса размерной элек-

трохимической обработки (ЭХО) металлов» (1998 г.). Результаты работы могут быть использованы при проектировании катодных устройств для электрохимической обработки металлов.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на итоговых научных конференциях Казанского государственного университета (1996-1999 гг.); Международной научно-технической конференции «Молодая наука – новому тысячелетию» (г. Набережные Челны, 1996 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Современная электротехнология в машиностроении» (г. Тула, 1997 г.); Городском научно-методическом семинаре по теоретической механике (г. Казань 1997 г.); Международной научно-технической конференции «Механика машиностроения» (г. Набережные Челны 1997 г.); Международной научно-технической конференции «Модели механики сплошной среды, вычислительные технологии и автоматизированное проектирование» (г. Казань 1997 г.); Молодежной Школе-конференции по теории функций (г. Казань 1998 г.); Всероссийской научной конференции «Краевые задачи и их приложения» (г. Казань, 1999); II международном научно-практическом семинаре «Современные электрохимические технологии в машиностроении» (г. Иваново 1999).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения и списка литературы, включающего 62 наименования. Объем диссертации составляет 126 страниц, на которых размещено 85 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, дан обзор литературы. Здесь же излагается краткое содержание диссертации, сформулированы выносимые на защиту положения.

В первом разделе диссертации рассматриваются задачи расчета формообразования и гидродинамики течения электролита при стационарной

электрохимической обработке двугранным катодом-инструментом. Рассматриваются различные схемы подачи электролита в межэлектродный промежуток.

1. Электролит подается через одну из граней на участке, размер которого много больше ширины МЭП. Этот участок моделирует, например, границу пористого электрода (вкладыша), через который электролит подается в межэлектродный зазор. Границы этого участка являются одновременно границей катода-инструмента. Участок, названный щелью, может быть участком токопроводящей сетки, через которую электролит поступает в межэлектродный зазор.

2. Электролит подается через одну из граней на участке, размер которого соизмерим с шириной МЭП (случай щели конечной длины).

3. Электролит подается из бесконечно удаленной точки и из участка щели конечной длины на катоде-инструменте

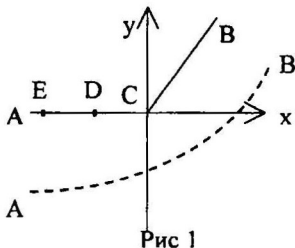
В первом пункте данного раздела излагается вывод граничного условия стационарности анодной границы.

Во втором пункте данного раздела приводится постановка задачи электрохимического формообразования двугранным катодом-инструментом.

Определить границу АВ межэлектродного зазора (рис.1), область существования комплексного потенциала $W_3 = \varphi_3 + i\psi_3$ – электростатического поля по следующим граничным условиям

$$\psi_3|_{AB} = 0, \psi_3|_{BCA} = 1 \text{ (условие эквипотенциальности границ)}$$

$$\left| \frac{dW_3}{dz} \right|_{AB} = \cos \theta \text{ (условие стационарности обработки).}$$



Этим условиям может быть дана гидродинамическая интерпретация, состоящая в определении границы фиктивного потока идеальной несжимаемой жидкости по условию на годограф скорости на этой границу.

В третьем пункте излагается метод годографа для решения сформулированной задачи.

В четвертом пункте представлен метод расчета гидродинамического потока электролита в межэлектродном зазоре основанный, на допущениях моделирование этого потока идеальной несжимаемой жидкостью и потенциальностью его течения. Решается задача по определению комплексного потенциала гидродинамического потока по следующим граничным условиям:

$$\psi_{\Gamma}|_{DCB} = 1, \psi_{\Gamma}|_{AB} = 0, \phi_{\Gamma}|_{AED} = 0$$

После определения комплексного потенциала разработан алгоритм расчета линий тока течения, одна из которых определяет уравнение анодной границы. В основе расчетов лежит связь точек физической области z и области изменения комплексного потенциала W_{Γ} гидродинамического потока, определяемая равенством:

$$z = \int_{i+a}^{w_{\Gamma}} dW_{\Xi} + i \frac{\Gamma(\beta + 1/2)}{\Gamma(\beta)\Gamma(1/2)} \int_{i+a}^{w_{\Gamma}} \int_0^1 \xi_1^{1/2} x^{-1/2} (1 - \xi_1 x)^{-\beta-1/2} dx \frac{dW_{\Xi}}{dW_{\Gamma}} dW_{\Gamma}, \quad (1)$$

где производная $\frac{dW_{\Xi}}{dW_{\Gamma}} = \frac{\operatorname{sh} \pi W_{\Gamma} - 1}{\operatorname{ch} \pi W_{\Gamma} + \operatorname{ch} \pi a}$ определяется из соответствия

областей изменения комплексного потенциала электростатического и гидродинамического поля,

$$\xi_1 = \frac{\operatorname{ch} \pi W_{\Gamma} - 1}{\operatorname{ch} \pi W_{\Gamma} + \operatorname{ch} \pi a}.$$

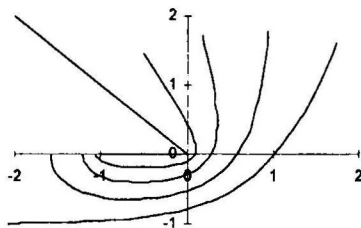


рис. 2

Выполнен расчет линий тока (рис.2). В качестве тестовой проверки служило уравнение анодной границы, полученная как эквипотенциаль течения электролита и сравненная с известным точным решением электростатической задачи.

В пятом пункте разработан алгоритм расчета поля давления и построение изобар в случае щели бесконечной длины.

Расчета поля давления в движущемся электролите важен для анализа областей роста и схлопывания газовых пузырьков и образования развитых газовых каверн. В основе модели лежат постулаты, обосновывающие применение для этого расчет интеграла Бернулли для идеальной несжимаемой среды, пренебрежение влиянием силы тяжести и предпосылок потенциального течения жидкости. Изобары $p=\text{const}$ соответствуют линиям постоянных скоростей $V=\text{const}$.

Разделяя вещественную и мнимую часть в выражении $\frac{1}{V} = \zeta \frac{dW_{\Xi}}{dW_{\Gamma}} = R + iI$, получаем, что на линии $V=\text{const}$ имеет место соотношение $R^2 + I^2 = \frac{1}{V^2}$ связывающее вещественную и мнимую части комплексного потенциала W_{Γ} на линии постоянной скорости.

$$\zeta = i \frac{\Gamma(\beta + \frac{1}{2})}{\Gamma(\beta)\Gamma(\frac{1}{2})} \zeta_1^{\frac{1}{2}} \int_0^1 x^{-\frac{1}{2}} (1 - \zeta_1 x)^{-\beta - \frac{1}{2}} dx + 1.$$

Изобары строились по следующему алгоритму: для определенного значения скорости для фиксированного значения Γ_{Γ} в диапазоне Φ_{\max} до Φ_{\min} с шагом $\Delta\Phi$ определялось значение ψ_{Γ} как решение нелинейного уравнения ме-

тодом деления отрезка пополам.

Далее по заданным значениям Γ_{Γ} и найденным значениям ψ_{Γ} определялись координаты x и y искомой линии. Построенный алгоритм предусматривает процедуру выбора диапазона отыскания решения. Результаты расчета представлены на рис.3 и указывают на области воз-

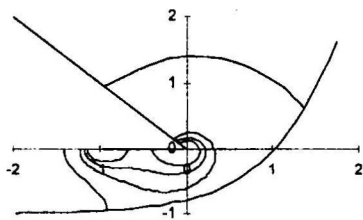


рис.3

возможного появления развитой каверны.

Проведен расчет поля давления и построены изобары для различных углов наклона боковой грани и различных расстояниях от угловой точки до начала щели..

В пятом пункте проводится расчет линий гидродинамического тока электролита, когда он подается в межэлектродный зазор через участок на катод-инструменте. Решается задача по определению комплексного потенциала гидродинамического потока по следующим граничным условиям (рис.1):

$$\Psi_{\Gamma}|_{DCB} = 1, \quad \Psi_{\Gamma}|_{AB} = \frac{1}{2}, \quad \Psi_{\Gamma}|_{EA} = 0, \quad \Phi_{\Gamma}|_{ED} = 0$$

Решение задачи по расчету линий тока определяются формулой (1), в которой

$$\frac{dW_{\Omega}}{dW_{\Gamma}} = - \frac{2sh\pi W_{\Gamma}}{\sqrt{ch^2\pi W_{\Gamma} + sh^2\pi b}},$$

$$\zeta_1 = \frac{(c+1)\left(\sqrt{ch^2\pi W_{\Gamma} + sh^2\pi b} - ch\pi W_{\Gamma}\right)}{-2 - ch\pi W_{\Gamma} + 2\sqrt{ch^2\pi W_{\Gamma} + sh^2\pi b}}, \quad c = - \frac{\sqrt{ch^2\pi a + sh^2\pi b}}{ch\pi a}.$$

Здесь a и b математические параметры задачи, они находятся по известным координатам x границ щели как решение системы нелинейных уравнений.

$$x_D = G \int_a^0 \frac{c+1\left((K(v)-ch\pi v)\right)^{1/2}}{(2(K(v)-cch\pi v))^{-\beta}} \frac{2sh\pi v}{K(v)} \int_0^1 x^{-1/2} \left(-((c+1)x-2c)ch\pi v + ((c+1)x-2)K(v)\right)^{-\beta-1/2} dx dv + \frac{1}{\pi} \ln \frac{|c+1|\left(\sqrt{1+sh^2\pi b}-1\right)}{(1-c)\left(\sqrt{1+sh^2\pi b}+1\right)}$$

$$x_E = G \int_b^a \frac{c+1\left((K(v)+ch\pi v)\right)^{1/2}}{(2(K(v)+cch\pi v))^{-\beta}} \frac{2sh\pi v}{K(v)} \int_0^1 x^{-1/2} \left(((c+1)x-2c)ch\pi v + ((c+1)x-2)K(v)\right)^{-\beta-1/2} dx dv + \frac{1}{\pi} \ln \frac{|c+1|\left(\sqrt{1+sh^2\pi b}+1\right)}{(1-c)\left(\sqrt{1+sh^2\pi b}-1\right)},$$

где

$$K(v) = \sqrt{ch^2\pi v + sh^2\pi b}.$$

Система уравнений была решена модифицированным методом Ньютона. Начальное приближение определялось незначительным отклонением координаты x_0 от значения φ . Пример расчета представлен на рис.4.

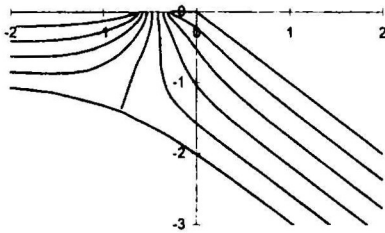


рис.4

В шестом пункте приводится расчет поля давления и изобар при ЭХО двугранным катодом инструментом в случае подачи электролита через щель конечной длины. Приведены расчеты поля давления и построены изобары для щелей конечной при различных углах наклона боковой грани.

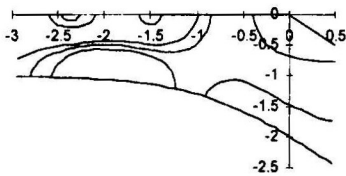


рис. 5

Пример расчета представлен на рис.5., проведен его анализ

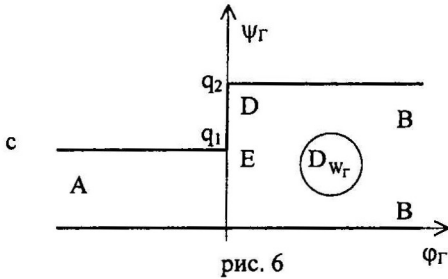
В седьмом пункте рассматривается задача расчета гидродинамики течения электролита в случае, когда часть электролита прокачивается через межэлектродный промежуток, а часть подается через стенку катода-инструмента.

Решение задачи расчета анодной границы определяется формулами:

$$z = \int_0^t \zeta \frac{dW_3}{du} du, \quad \zeta = c_1 \int_0^t \frac{u^{\beta-1}}{\sqrt{u-1}} du, \quad \frac{dW_3}{dt} = \frac{1}{\pi(t-1)} \quad (2)$$

Используются следующие граничные условия для комплексного потенциала (рис.1):

$$\psi_{\Gamma}|_{AB} = 0, \quad \psi_{\Gamma}|_{AE} = \text{const} = q_1, \quad \varphi_{\Gamma}|_{DE} = 0, \quad \varphi_{\Gamma}|_{DB} = \text{const} = q_2$$



В данном разделе полагается, что величина $(q_2 - q_1)$ определяется связью ее величины величиной тока, протекающего через участок DE . Последнее определяется из результатов решения задачи электрохимического формооб-

разования.

В области гидродинамического комплексного потенциала течению по выбранной схеме соответствует четырехугольник (рис.6). Отображение верхней полуплоскости D_I на область D_{w_Γ} осуществляется при помощи интеграла Кристоффеля-Шварца, производная которого равна

$$\frac{dW_\Gamma}{dt} = c_2 \frac{\sqrt{t-e}}{\sqrt{t-d(t-1)}}. \quad (3)$$

Предложен следующий алгоритм расчета линий: фиксируется значение t_1 ($t=t_1+it_2$), из (3) определяется значение t_2 при заданной постоянной ψ , далее

по известным значениям t_1 и t_2 с помощью формул (2) находятся координаты точки линии тока. При-

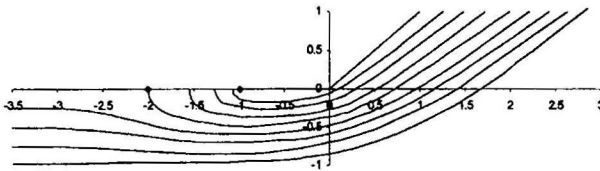


рис. 7

мер результатов расчета представлен на рис.7.

Для расчета изобар используется соотношение

$$\left| \frac{t^\beta \sqrt{t-1}}{\sqrt{t-e}} \int_0^1 \frac{u^{\beta-1}}{\sqrt{tu-1}} du \right| = \text{const}$$

Рассчитаны поля давления и построены изобары, дан их анализ.

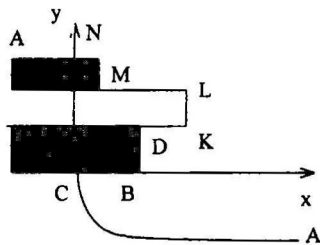


Рис. 8

Во втором разделе диссертации рассматриваются решение задач расчета двумерного стационарного электрохимического формообразования при обработке специальным инструментом, состоящим из рабочих участков и участков, покрытых изоляцией. Подобное устройство характерно, например, для хона-инструмента

для электрохимической обработки каналов. Рассчитывается гидродинамика течения электролита в межэлектродном промежутке.

В первом пункте дан алгоритм решения задачи по расчету электрохимической формообразования анодной поверхности специальным хонинструментом (фрезой), схема межэлектродного промежутка показана на рис.8. Инструмент перемещается вдоль обрабатываемой поверхности. Используются следующие граничные условия для комплексного потенциала:

$$\psi|_{CA} = 0, \quad \psi|_{DKLM} = 1, \quad \phi|_{CBD} = 0, \quad \phi|_{MNA} = \text{const} = q$$

и условие стационарности $\left\| \frac{dW}{dz} \right\|_{CA} = \cos \theta$, где θ угол наклона касательной к оси y .

Задача по расчету анодной границы решена методом годографа скорости. Получено следующее параметрическое уравнение анодной границы

$$\begin{cases} x = c_1 c_2 \int_1^t \frac{1}{\sqrt{v-m}\sqrt{v-d}\sqrt{v-1}} \int_1^v \frac{(s-q)(s-p)(s-r)ds}{\sqrt{s}\sqrt{s-1}\sqrt{s-k}\sqrt{s-l}\sqrt{s-n}} dt \\ y = -c_2 \int_1^t \frac{1}{\sqrt{v-m}\sqrt{v-d}\sqrt{v-1}} dt \end{cases}$$

где c_1, c_2 — находятся из условия соответствия точек областей D_ζ (полученной в результате преобразования инверсии относительно окружности единичного радиуса в области годографа скорости), D_w (комплексного потен-

циала) и канонической области D_t - верхней полуплоскости. Здесь p, q, r, l, k, m, n и d - математические параметры задачи.

Разработан метод расчета гидродинамических линии тока в межэлектродном зазоре на основании формулы, связывающей точку в физической плоскости с точкой в области комплексного потенциала

$$z = \int_1^{\varphi_\Gamma + i\psi_\Gamma} \zeta \frac{dW}{du} du,$$

$$\text{где } \frac{dW}{dt} = c_2 \frac{1}{\sqrt{t-l}\sqrt{t-d}\sqrt{t-m}}, \quad \zeta = c_1 \int_1^t \frac{(t-p)(t-q)(t-r)dt}{\sqrt{t}\sqrt{t-l}\sqrt{t-k}\sqrt{t-l}\sqrt{t-n}} - i.$$

Кроме давления жидкости (электролита) на анодную поверхность среда оказывает на эту поверхность и касательное напряжение. Касательные напряжения, действующие со стороны жидкости на анодную поверхность, рассчитываются с использованием соотношений вязкого пограничного слоя. Для расчета вязкого потока применяется однопараметрический метод расчета турбулентного пограничного слоя, основанный на исследовании уравнения импульсов, и приводящей к следующим выражениям

$$\begin{cases} \tau_w(t) = 0.00655^{\frac{6}{7}} \rho \left(\frac{v}{aV_0} \right)^{\frac{1}{7}} V^{2+\frac{b-2}{7}} \left[\int_1^t V^{b-2} dt \right]^{-\frac{1}{7}} \\ s(t) = \int_1^t \frac{V_0}{V(t)} dt, \quad a = 1.17, \quad b = 4.7 \end{cases}$$

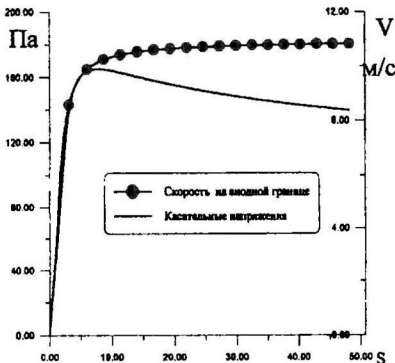


Рис. 9

s -длина дуги, V_0 - характерная скорость. Распределение скорости V на внешней границе пограничного слоя берется совпадающим со скоростью на анодной границе.

Результаты расчета касательных напряжений и скорости течения на анодной границе представлены на

рис.9 ($\rho=1.03 \text{ г/см}^2$, $V_0=10 \text{ м/с}$ $v=1.141 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) Отмечается характерный максимум этих напряжений. Порядок этих напряжений соответствует величинам отрыва донных взвесей.

Во втором пункте разработан метод решения задачи электрохимического хонингования хоним-инструментом (фрезой) при наличии горизонтальной линии симметрии. Решение задачи по расчету анодной границы дается следующими формулами:

$$z = \int_1^t \zeta \frac{dW}{du} du, \quad \zeta = -c_1 \int_0^t \frac{(u-p)(u-q)(u-r)(u-s)du}{\sqrt{u}\sqrt{u-1}\sqrt{u-k}\sqrt{u-l}\sqrt{u-n}(u-a)^2},$$

где p, q, r, s, k, l, n, a – параметры задачи.

Приведен расчет гидродинамических линий тока электролита и касательных напряжений на анодной границе. Для решения задачи построения линий тока используются формулы:

$$dz = \zeta \frac{dW}{dt} \frac{dt}{dW_\Gamma} dW_\Gamma, \quad \frac{dt}{dW_\Gamma} = (1-a)\pi e^{\pi W_\Gamma}$$

Выполнены расчеты анодной границы, подтравливания под изоляцию и линии тока. Проведен анализ влияния линии симметрии на характер анодного формообразования и течение электролита

В третьем пункте решается задача расчета формообразования при стационарной ЭХО хоним-инструментом, состоящим из двух частей, что

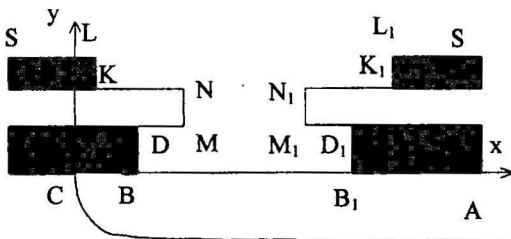


рис.10

особенно важно при анализе возвратно-поступательного движения инструмента вдоль обрабатываемой поверхности. Схема межэлектродного зазора представлена на рис.10. Со-

гласно граничным условиям, область D_W комплексного потенциала $W=\varphi+i\psi$ представляет собой семиугольник (рис. 11).

Решение задачи, осложненное двулиственным характером области годографа скорости, дается формулами:

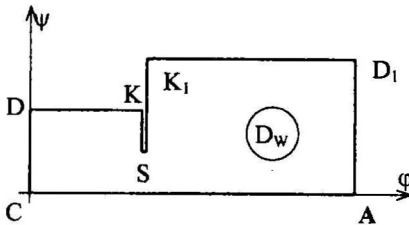


рис. 11

$$z = \int_1^t \zeta \frac{dW}{du} du,$$

$$\zeta = c_1 \int_0^t \frac{\prod_{i=1}^6 (u - \alpha_i)}{(u - \beta_6) \prod_{i=1}^{10} \sqrt{u - \beta_i}} du,$$

$$\frac{dW}{dt} = c_2 \prod_{i=1}^6 \frac{1}{\sqrt{t - \gamma_i}}, \text{ где}$$

$$c_2 = \left(\int_d^1 \prod_{i=1}^6 |t - \gamma_i|^{-\frac{1}{2}} \right)^{-1}$$

α_i β_i γ_i — математические параметры задачи. Полученные выражения содержат 18 математических параметров, семь из них находятся из условий $\zeta_{N_1} = \zeta_N = \zeta_L = \zeta_{L_1} = \zeta_M = \zeta_{M_1} = \zeta_{B_1} = 0$, остальные связаны с геометрическими размерами хона-инструмента. Задача была решена в полуобратной постановке, по заданным математическим параметрам находились геометрические

размеры хона-инструмента.

Методом пристрелки получены значения недостающих параметров, соответствующих схеме рис.12

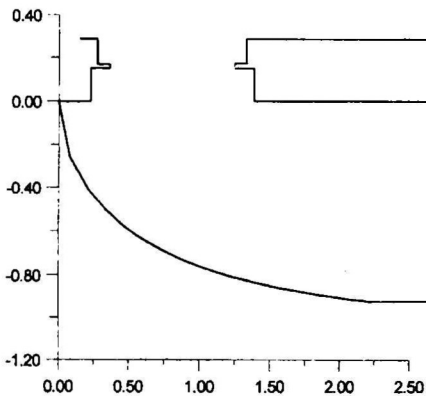


рис. 12

Результаты расчета позволяют оценить влияние второй части хона-инструмента на характер анодной границы

В четвертом пункте производится расчет траектории движения продуктов реакции в межэлектродном промежутке из области подтравливания под изоляцию при стационар-

ном промежутке из области подтравливания под изоляцию при стационар-

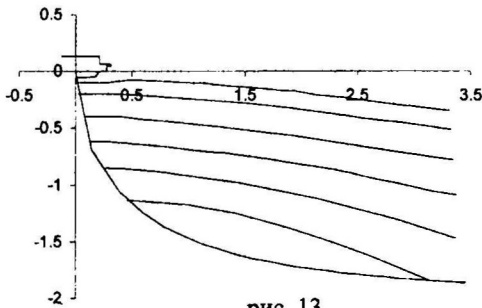


рис. 13

ной ЭХО специальным хон-ном-инструментом. Проведенные расчеты показали, что в указанной области торможения скорость потока мала, и расчет можно выполнить в «так называемом» акустическом приближении. Продукты реакции модели-

руется круговыми цилиндрами. Влияние этих продуктов на поток электролита полагается малым.

Сила, действующая на отдельную частицу, определяется равнодействующей сил \vec{F} гидродинамического давления P среды по границе этой частицы. Проекция этой силы в случае кругового цилиндра определяются интегралом

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = \int_0^{2\pi} P \begin{Bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{Bmatrix} d\theta. \quad (4)$$

Разработанный алгоритм позволяет выполнить расчет указанного давления

Предложен следующий алгоритм расчета траекторий движения частиц: За время Δt центр частицы переместится на расстояния $Z_{n+1} = Z_n + V_{r_n} \Delta t$, при этом его скорость станет равной $V_{r_{n+1}} = V_{r_n} + \frac{F}{m} \Delta t$. Сила F вычисляется по формуле (4), давление P выражается через скорость жидкости V в точке границы частицы с помощью интеграла Бернулли. Выражение скорости V в зависимости от ϕ_Γ и ψ_Γ получено в п.2.1., ϕ_Γ ψ_Γ находятся по известной координате точки на поверхности частицы как решение системы нелинейных уравнений.

Результаты расчета представлены на рис.13. при следующих значениях параметров: плотность электролита $\rho_\Theta = 1.03 \text{ г/см}^3$, что соответствует 10%

концентрации NaCl в воде, радиус частицы 0.05 Н , где Н – характерный размер, совпадающий с величиной стационарного межэлектродного зазора между параллельными электродами, плотность частицы $\rho_r = 7 \text{ г/см}^3$

Анализ характера траектории показывает тенденцию смещения частиц из области подтравливания в направлении анодной границы. Последнее свидетельствует о возможности экранирования анодной поверхности продуктами реакции и возникновения областей, локализирующих зону обработки.

В третьем разделе диссертации рассматривается решения задач стационарного электрохимического формообразования с учетом зоны локализации анодного растворения металла. Производится расчет гидродинамики течения электролита в

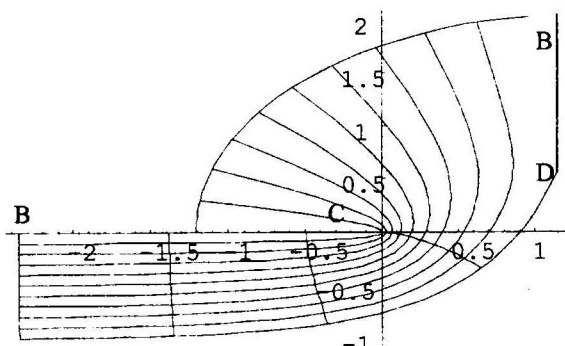


рис.14

указанных задачах и расчет траекторий движения продуктов реакции в межэлектродном промежутке при электрохимическом хонинговании с учетом зоны локализации.

В первом пункте

производится расчет

электрохимического формообразования и гидродинамики течения электролита при обработке горизонтальным катодом-пластинкой с учетом зоны локализации. Граничные условия, указанные в пункте 1 дополняются условием локализации $x=h$ на участке анодной границы DB (рис.14). Это условие может получаться как естественным путем, так и способом конструктивного покрытия анодной поверхности нерастворимой тонкой пластиной из металла, нерастворимого в режиме ЭХО анодной поверхности.

Получено следующее выражение, связывающее точку в физической плоскости с точкой в плоскости комплексного потенциала:

$$z = c_1 \left\{ \frac{4}{\pi} e^{\frac{1}{2}\pi\varphi} \left(\cos \frac{\psi\pi}{2} + i \sin \frac{\psi\pi}{2} \right) + \left(\frac{2i(d-p)}{\sqrt{d}} \operatorname{Arc cot}(\sqrt{d}) - 2i \right) (\varphi + i\psi - i) + 2i \right\} -$$

$$- c_1 \int_i^{\varphi+i\psi} \frac{2(d-p)}{\sqrt{d}} \operatorname{Arcth} \left(\frac{e^{\frac{1}{2}\pi W}}{\sqrt{d}} \right) dW$$

Здесь $c_1 = 2i \left(\frac{d-p}{\sqrt{d}} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{\sqrt{d}} \right) \right)^{-1}$.

На рис.14 представлены результаты расчета анодной границы, линий тока и эквипотенциалей.

Во втором пункте разработан метод расчета формообразования при стационарной ЭХО двугранным катодом-инструментом с произвольным углом наклона грани с учетом зоны локализации.

Получено следующее уравнение анодной границы $x=x_0+\varphi$ $y=y_0+y_1$

$$\begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -1 \end{Bmatrix} - c \int_0^1 \int_0^1 \frac{f_1^{\beta-1}(-1)f_1(p)}{\sqrt{vf_1(d)}} \begin{Bmatrix} \cos \\ \sin \end{Bmatrix} \left(\frac{\pi\psi}{2} + (\beta-1)f_2(-1) + f_2(p) - f_2(d) \right) dv d\psi,$$

$$y_1 = c \int_0^{\varphi} e^{\frac{\pi s}{2}} \int_0^1 \frac{(ve^{\pi s} + 1)^{\beta-1} (ve^{\pi s} - p)}{\sqrt{v}(ve^{\pi s} - d)} dv ds$$

где $f_1(a) = \sqrt{(v \cos \pi\psi + a)^2 + (v \sin \pi\psi)^2}$, $f_2(a) = \operatorname{arctg} \frac{v \sin \pi\psi}{v \cos \pi\psi + a}$,

$$c = \left(\int_{-1}^0 \frac{(u+1)^{\beta-1} (u-p)}{\sqrt{-u(u-d)}} du \right)^{-1}$$

Параметр p находится из условия $\zeta_D=0$ в виде равенства

$$p = \frac{f_3(1) - c^{-1}}{f_3(0)}, \text{ где } f_3(\alpha) = \int_0^d \frac{(u+1)^{\beta-1} u^{\alpha-1/2}}{(u-d)}.$$

Математический параметр d находится из условия $x_D=h$. Пример расчета анодной границы представлен на рис.15.

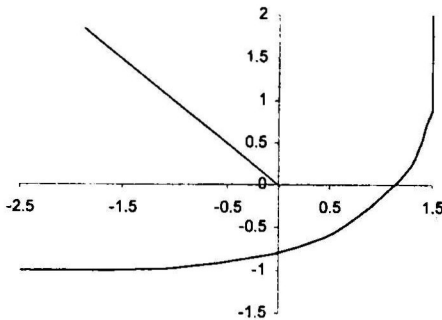


рис. 15

В третьем пункте в качестве тестового производится расчет формообразования прямоугольным катодом-инструментом с учетом зоны локализации процесса ЭХО. Алгоритм расчета в этом случае упрощается. Произведено сравнение полученных результатов с результатами из пре-

дыдущего пункта (совпадение с точность до 10^{-3}).

В четвертом пункте приводится решение задачи расчета электрохимического формообразования при стационарной ЭХО специальным хонинструментом (фрезой) с учетом зоны локализации процесса анодного растворения металла. Форма хона-инструмента та же, что и в пункте 2.1. При расчете анодной границы используется выражение

$$\frac{d\zeta}{dt} = c_1 \frac{(t-p)(t-q)(t-r)(t-s)}{\sqrt{t}\sqrt{t-l}\sqrt{t-k}\sqrt{t-n}(t-a)}.$$

Пример расчета анодной границы представлен на рис. 16. Задача решена в полуобратной постановке

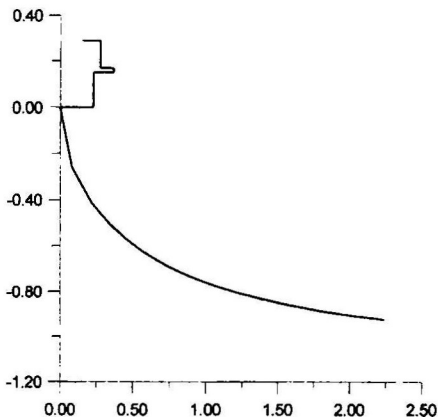


рис. 16

Выполнены расчет гидродинамики течения электролита и построение гидродинамических линий тока электролита, а также расчет вязких напряжений на анодной границе. Результаты расчета вязких напряжений при указанных выше параметрах представлены на рис.17 характерно, что в точке начала зоны локализа-

ции касательные напряжения на границе падают до нуля.

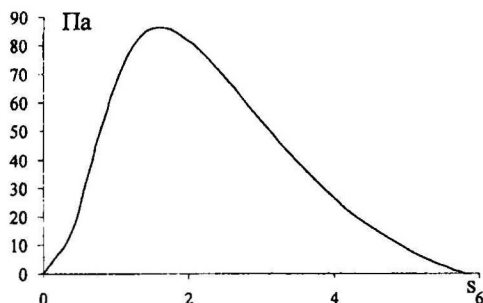


рис. 17

В пятом пункте приводится расчет траектории движения частицы продукта реакции в межэлектродном промежутке при стационарном электрохимическом хонинговании с учетом зоны локализации анодного растворения. Исследует-

ся область начального участка этого движения в окрестности подтравливания под изоляцию на катоде инструменте. Как и выше считаем, что скорость движения жидкости в этой окрестности близка к нулю, а перемещение частиц определяется полем гидростатического давления

Выполнены расчеты траекторий движения частиц для продуктов реакции разных плотностей и отмечены тенденции к оседанию продуктов реакции на анодной границе. Для частицы с меньшей плотностью это оседание происходит ближе к области подтравливания под изоляцию.

В заключении подводятся краткие итоги проделанной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработан метод расчета гидродинамики течения в межэлектродном зазоре в окрестности угловой точки двугранного катода-инструмента с произвольным углом наклона боковой с учетом подачи электролита через катод-инструмент при стационарном режиме ЭХО. Построены гидродинамические линии тока электролита в межэлектродном промежутке, произведен расчет полей скоростей и построены изобары для трех различных способов подачи электролита в межэлектродный зазор. Проведен анализ областей тор-

можения и больших скоростей потока как зон возможного скопления продуктов реакции и кавитации потока

2. Разработан метод расчета электрохимического хонингования катодом-инструментом с учетом областей диэлектрического покрытия катода-инструмента. Решена задача расчета формообразования при стационарной ЭХО различными хонами-инструментами. Произведен расчет гидродинамики течения электролита и построены линии гидродинамического тока. Произведен расчет вязких напряжений на анодной границе при электрохимическом хонинговании. Проведен анализ гидродинамических полей в области подтравливания под изоляцию, а так же вязких напряжений на анодной поверхности. Выполнен расчет траектории движения частицы продуктов реакции в межэлектродном зазоре.

3. Разработан метод расчета электрохимического формообразования с учетом зоны локализации процесса анодного растворения металла для вариантов обработки по схемам электрохимической прошивки каналов, а так же электрохимического фрезерования (хонингования). Произведен расчет анодной границы для нескольких схем межэлектродного промежутка: при обработке горизонтальным катодом-пластинкой; прямоугольным катодом-инструментом; двугранным катодом-инструментом и специальным хонинг-инструментом. Разработан метод расчета гидродинамики течения электролита в межэлектродном зазоре, построены гидродинамические линии тока электролита. Выполнен расчет переноса продуктов реакции с учетом возникновения зоны локализации обработки. Рассчитаны траектории движения частиц шлама в межэлектродном промежутке при стационарном электрохимическом хонинговании с учетом зоны локализации.

4. Разработан программный комплекс для реализации расчетов по созданным методикам.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

1. Рябчиков М.Е., Шкарбан А.Ю. Гидродинамика при ЭХО двугранным катодом-инструментом. // тез. Междун. н.-т. конф. Молодая наука – новому тысячелетию. Наб. Челны, 1996, ч.1., с 10-11.
2. Клоков В.В., Рябчиков М.Е., Шкарбан А.Ю. Модели гидродинамического поля в межэлектродном зазоре. // Сборник трудов Всерос. н.-т. конф. Современная электротехнология в машиностроении. Тула, 1997, с.52-53.
3. Клоков В.В., Шкарбан А.Ю. Формообразование при электрохимическом хонинговании. / «Модели механики сплошной среды, вычислительные технологии и автоматизированное проектирование». Труды I межд. конф., Казань, 1997, т.1, 196-200.
4. Клоков В.В., Шкарбан А.Ю. Формообразование при электрохимическом хонинговании. / Механика машиностроения, Тез. докл. межд. н.-т. конф., Наб. Челны, 1997, с 8-9.
5. Шкарбан А.Ю. Расчет Электрохимического хонингования с учетом зоны локализации. / Труды математического центра имени Н.И. Лобачевского. Казань: Унипресс, 1998 с. 264-266.
6. Шкарбан А.Ю. Гидродинамика течения электролита при стационарной электрохимической обработке двугранным катодом-инструментом. / Тез. Докл. II межд. н.-прак. сем. «Современные электрохимические технологии». / Иваново, 1999, с. 33-34.
7. Шкарбан А.Ю. Гидродинамика в ячейке при электрохимической размерной обработке. / Труды математического центра им. Н.И. Лобачевского, Казань, Унипресс, 1999, т. 3, с. 190-191.



Подписано в печать 21.04.2000 г.
Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз.
Отпечатано в издательском комплексе
Управления международных связей КГУ

d-00